

火电厂钢球磨煤机负荷的灰色 PID 控制系统研究

程启明, 闵乐聪, 李 芹, 王志萍

(上海电力学院 电力与自动化学院, 上海 200090)

摘 要: 火电厂钢球磨煤机的负荷对象具有大滞后、慢时变、强非线性等复杂特性, 采用常规控制方法难以获得满意的控制效果, 提出了基于灰色预测 PID 控制的球磨煤机负荷控制方法, 它融合了灰色预测与常规 PID 控制这两者的设计思想, 将灰色预测在线预测结果代替被控对象测量值, 再进行 PID 控制运算。Simulink 仿真结果表明, 灰色预测 PID 控制在控制的快速性、稳定性、适应性、鲁棒性、抗干扰性上均优于常规 PID 控制和带 Smith 预估 PID 控制。

关 键 词: 球磨煤机负荷; 灰色预测; GM(1, 1)模型; PID 控制; Smith 预估器

中图分类号: TK223.25; TP273 文献标识码: A

引 言

灰色系统理论是由我国学者邓聚龙提出并逐步发展起来的一门学科^[1], 现已广泛应用于经济、农业、生态、地质、管理和控制等领域。

灰色预测控制是一种将控制理论和灰色系统理论相结合的新型控制方法^[2]。它通过系统行为数据系列的提取寻求系统发展规律, 从而按规律预测系统未来的行为, 并根据系统未来的行为趋势确定相应的控制决策进行预测控制, 这样可以做到防患于未然和及时控制。灰色预测需要的原始数据少、计算简单, 且不需要被控系统的精确模型, 目前已在工业控制中得到了广泛应用^[3~7]。

钢球磨煤机是目前我国火电厂制粉系统中使用最多的磨煤设备, 球磨机是一个具有多变量、强耦合、大时滞、大惯性和时变性的复杂控制对象, 直接对其控制非常困难。为简化控制的复杂性, 可把球磨机负荷对象分离出来, 得到一个相对独立的单变量球磨机的负荷控制系统^[8]。由于这个负荷控制对象仍具有强非线性、大滞后、慢时变等复杂特性, 常规 PID 控制等方法难以获得满意的控制效果^[9~12]。一些学者提出了很多改进控制方法, 这些方法可归

结为 3 类, 即基于智能控制的 PID 控制方法^[10]、基于 Smith 预估器的控制方法^[11]、PID 控制与内模控制或预测控制结合的方法^[12], 但它们均还存在一些问题, 其中第 1 类控制方法是根据当前的误差信号来决定下一步的控制量, 属于“事后控制”; 第 2 类需要知道被控对象精确的数学模型; 第 3 类是基于 CARMA 模型的控制算法, 需要求解复杂的 Diophantine 方程, 计算量很大。因此球磨机负荷的控制是一个比较困难的任务。本研究尝试采用在传统的 PID 控制中加入灰色预测的控制方法^[5,9]来实现球磨机负荷控制, 较好地解决了这些问题, 仿真结果表明了这种负荷控制方法的有效性和可行性。

1 灰色预测 PID 控制原理

1.1 基于灰色预测 PID 的控制系统结构

灰色预测 PID 控制^[5,9]将传统的 PID 控制和灰色理论结合起来克服系统不确定性和延时问题。它是在原有系统 PID 控制模型的基础上建立一个灰色预测模型 GM(1, 1), 用于补偿模型不确定性、参数时变等原因造成的系统不确定性。通过对灰色预测模型 GM(1, 1)进行参数辨识, 在 PID 控制律上加一个直接补偿控制律, 形成新的控制律作用在球磨机负荷被控对象上, 最终达到有效控制负荷系统不确定性和延时的目的。

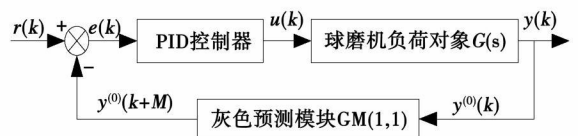


图 1 基于灰色预测 PID 的控制系统结构

基于灰色预测 PID 的控制系统结构如图 1 所示。图中灰色预测模块的作用就是把系统的输出 y

收稿日期: 2008-08-08; 修订日期: 2008-12-07

基金项目: 上海市教委重点科研基金资助项目(06ZZ69); 上海市教委重点学科建设基金资助项目(J51301)

作者简介: 程启明(1965-)男, 江苏盐城人, 上海电力学院教授。

(k)读入(记作 $y^{(0)}(k)$), 根据灰色预测算法计算预测系统未来的趋势。预测了一定时间后的输出值 $y^{(0)}(k+M)$ 代替此刻的 $y^{(0)}(k)$, 并与设定值 $r(k)$ 比较, 产生的偏差 $e(k)$ 作为 PID 控制器的输入, PID 控制器输出 $u(k)$ 就是被控对象的输入。

1.2 灰色预测模型

灰色模型是由一组灰色微分方程组成的动态模型, 记为 GM(n, h), 其中 n, h 分别为微分方程的阶数、变量个数。典型的灰色模型 GM(1, 1) 是由一个单变量一阶微分方程构成。

GM(1, 1)模型假设原始序列为 $X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(m)\}$ (m 为建模维数)^[2], 它是一组信息不完全的灰色量, 具有很大的随机性。对 $X^{(0)}$ 进行一次累加生成操作, 得到序列为:

$$X^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(m)\}, x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), k = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

在数据生成的基础上, 用线性动态模型对生成的数据拟合和逼近, 得到相应的 GM(1, 1)模型为:

$$dx^{(1)}/dt + ax^{(1)} = u \quad (2)$$

式中: a, u —发展系数、灰色作用量。微分方程的离散解为:

$$x^{(1)}(k+1) = [x^{(0)}(1) - u/a] \exp(-ak) + u/a \quad (k=0, 1, \dots, m-1) \quad (3)$$

为得到的原始数据对 $k+1, k+M$ (M 为预测步数)时刻的预测, 则:

$$x^{(0)}(k+1) = x^{(1)}(k+1) - x^{(1)}(k) = [x^{(0)}(1) - u/a] \exp(-a)(1 - \exp(-a)) \quad (4)$$

$$x^{(0)}(k+M) = [x^{(0)}(k) - u/a] \exp(-aM) (1 - \exp(-a)) \quad (5)$$

灰色预测就是利用 GM(1, 1)模型对系统将来时刻的输出进行预测方法。上述微分方程的待辨识的系数可用最小二乘法求出, 其向量形式为:

$$\theta = [a, u]^T = (B^T B)^{-1} B^T \gamma \quad (6)$$

其中,
$$B = \begin{bmatrix} -(x^{(0)}(1) + x^{(0)}(2))/2 & 1 \\ -(x^{(0)}(2) + x^{(0)}(3))/2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -(x^{(0)}(m-1) + x^{(0)}(m))/2 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\gamma = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(m) \end{bmatrix} \quad (7)$$

GM(1, 1)模型对具有指数变化规律且增长速度不快的数据序列具有较好的预测效果, 但它的预测值与计算零点 $x^{(0)}(1)$ 、预测步数 M 、建模维数 m 都

有关^[5]。只有选取适当的灰色模型参数, 才能比较准确地预测系统行为的发展变化, 使灰色预测起到超前的作用, 提高预测的准确性和实时性。为此, 采取下面一些改进措施^[2, 5]:

第一个数据 $x^{(0)}(1)$ 计算零点建立起来的模型预测精度不高, 通过下面方式改变初始条件, 从而提高模拟精度。这种方式的解为:

$$x^{(1)}(t) = c \exp(-at) + u/a \quad c = (D^T D)^{-1} D^T A \quad (8)$$

其中,
$$D = \begin{bmatrix} \exp(-a) \\ \exp(-2a) \\ \vdots \\ \exp(-ma) \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} x^{(1)}(1) - u/a \\ x^{(1)}(2) - u/a \\ \vdots \\ x^{(1)}(m) - u/a \end{bmatrix} \quad (9)$$

一般系统的滞后或惯性越大, 预测步数 M 也越大, 当 M 超过一定值后, 不可知因素增加, 预测精度逐渐下降。兼顾预测精度和求解白化方程的计算量, 一般系统的建模维数可取 $m = 4 \sim 6$ ^[4]。

数据序列的光滑度可定义为:

$$\rho(k) = x^{(0)}(k) / \sum_{i=1}^{k-1} x^{(0)}(i), k = 1, 2, 3, \dots, m \quad (10)$$

改善原始数据序列的光滑度可提高灰色预测模型的预测精度, 本研究采用自然指数函数对原始数据进行变换, 再采用以 e 为底的对数函数对预测得到的数据进行还原。

由于对象是发展变化的, 系统的历史信息对系统预测有作用, 但与预测时间接近时间的信息(新息)对系统的特性作用更大。因此, 采用了等维新息 GM(1, 1)模型, 即将新息数据加入到原始序列中, 同时去掉一个老数据, 保持建模维数 m 不变。

1.3 球磨机负荷控制系统的数学模型

负荷控制系统被控对象的广义动态特性的数学模型可通过试验方法获得, 即用给煤机转速的阶跃扰动试验, 获取表征球磨机负荷信号的飞升曲线, 用工程法拟合负荷控制系统被控对象的数学模型。试验中采用某电厂球磨机负荷的对象模型 $G(s)$ 为^[9]: $G(s) = g(s)e^{-\tau s} = 2.78 / (1 + 113.1s)^2 e^{-50s}$ (11) 式中: $g(s)$ —对象除去纯迟延环节后的传递函数; τ —对象的纯迟延。

1.4 常规 PID 控制与 Smith 预估补偿器的算式

为了说明本方法的优点, 把本研究的控制方法与常规的 PID 控制方法在 Simulink 仿真环境下进行仿真比较。常规的 PID 控制器数字式为:

$$u(k) = K_p [e(k) + \frac{1}{T_i} \sum_{j=1}^k T_s e(j) + T_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s}] \quad (12)$$

式中: e —系统误差($e=y-r$); T_s —采样周期; K_p 、 T_i 、 T_d —PID 的比例系数、积分时间、微分时间 3 个控制参数。

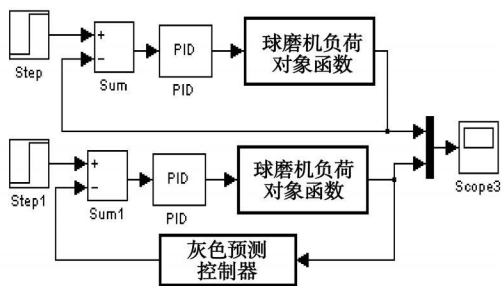
带 Smith 预估补偿器的 PID 控制系统结构与图 1 相似, 只是把图中灰色预测模块改为 Smith 预估补偿器。Smith 预估补偿器是广泛应用于克服大延迟对象的补偿办法, 它通过预估器使被延迟了 τ 的被调量超前反映到调节器, 使调节器提前动作, 从而减小超调量和加速调节过程。它的传递函数 $G_s(s)$ 为:

$$G_s(s) = g(s)(1 - e^{-Ts}) \tag{13}$$

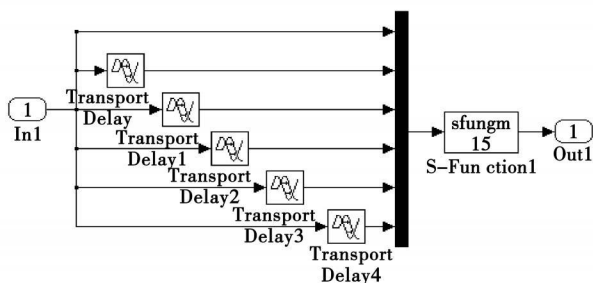
2 球磨机负荷的灰色 PID 控制仿真

2.1 负荷控制系统的 SIMULINK 仿真结构

图 2 为负荷控制系统的 SIMULINK 仿真结构^[5], 其中图 2(a)为灰色 PID 与普通 PID 两种控制系统的 SIMULINK 仿真结构, 图 2(b)和 (c)分别为图 2(a)中灰色预测器模块 GM(1, 1)、球磨机负荷对象函数的内部结构。图 2(b)中的延时环节分别设定延时时间为 1、2、3、4 和 5 s, 从上至下 6 个输入作为 GM(1, 1) 的 S 函数 sfungm15.m 的输入, 最终用 S 函数模块形式进行封装。



(a) 两种控制系统 SIMULINK 仿真结构



(b) 灰色预测器模块 GM(1,1) 内部结构



(c) 球磨机负荷对象函数

图 2 负荷控制系统的 SIMULINK 仿真结构

2.2 在正常情况下控制仿真

根据常规 PID 控制器的参数按照 Z-N 经验进行整定, 设置 PID 参数为 $T_i=175$, $k_p=1.2$, $T_d=41$ s。灰色 PID 控制器中, $T_s=1$ s, $m=6$, $M=10$, $r=1$, 灰色预测模块加入时间点 $h=80$ s, 得到图 3 两种控制器仿真曲线。从图可见, 灰色预测 PID 控制品质优于常规 PID 控制, 它的超调量、峰值时间和稳定时间明显要小。

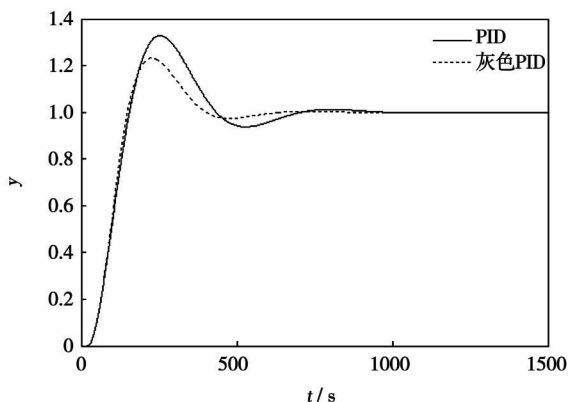


图 3 常规 PID 与灰色 PID 仿真比较曲线

2.3 预测步长 M 对灰色预测的影响

灰色算法中涉及到预测步长 M 的选取问题, 当 M 不同时, 其动态性能不同。图 4 为 M 取不同值时的仿真曲线, 图中从左到右的曲线的 M 分别取为 14、16、18 和 20 ($T_s=0.5$ s)。由图可见, $M=14$ 时 (左边实线), 虽然超调量比较大, 但是调节过渡过程时间变短; $M=20$ 时 (右边虚线), 超调量偏小, 但是反映时间过长; $M=18$ 比 $M=14$ 、16、20 的效果都要好一点。随着 M 的增加, 超调量逐渐变小, 过渡过程时间变大。灰色预测 PID 控制应选取合适的 M , 才能得到较好的控制效果。

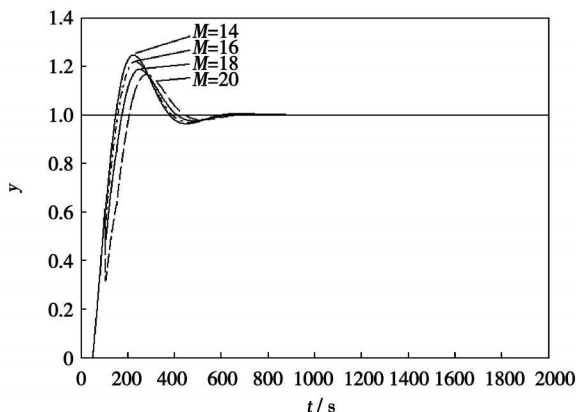


图 4 不同预测步长 M 下的仿真比较曲线

2.4 在设定值扰动下控制仿真

如果在系统稳定工作后, 设定值突然发生改变 (在 $t=800\text{ s}$ 时, 加入单位阶跃干扰), 灰色 PID 控制效果如图 5 所示 (采样周期 $T_s=0.5\text{ s}$)。从图可见, 在设定值发生阶跃变化时, 因灰色预测环节对系统的行为进行了超前预测, 使灰色预测控制系统中被控对象的超调量得到很好地抑制, 系统在 $t=1\ 580\text{ s}$ 后重新稳定在新的设定值上, 灰色 PID 曲线 (实线) 的抗干扰能力好于常规 PID 曲线 (虚线)。

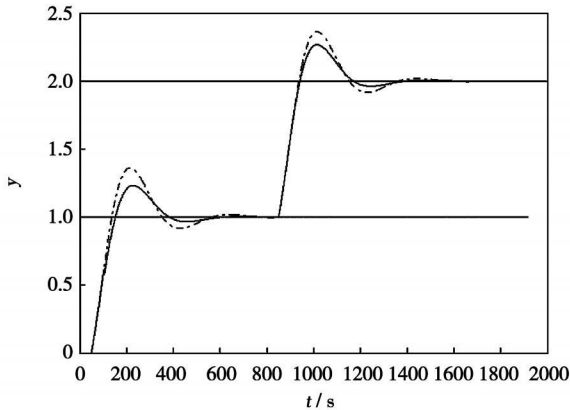


图 5 设定值稳定后再单位阶跃上升情况

2.5 在对象 $G(s)$ 变化情况下控制仿真

磨煤机负荷对象具有时变性, 假设某电厂负荷对象在两种不同情况下的传递函数为^[5]:

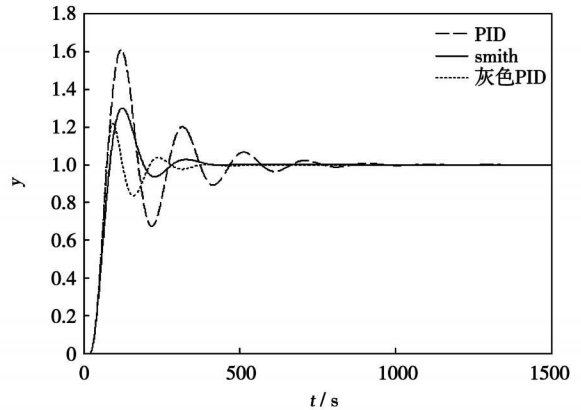
$$G_1(s) = \frac{1}{(1+50s)(1+150s)} e^{-25s} \quad (14)$$

$$G_2(s) = \frac{1}{(1+49s)(1+135s)} e^{-50s}$$

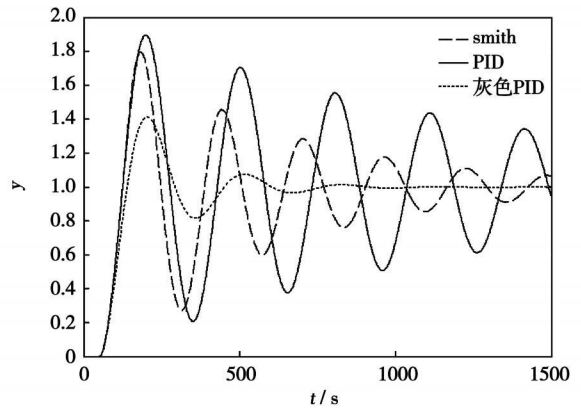
仿真中, 灰色 PID 控制器的相关参数取为 $M=23$, $T_s=1\text{ s}$, $m=6$, 还加入了 Smith 预估补偿方法与本研究灰色预估补偿做对比, 图 6 为负荷从 $G_1(s)$ 变为 $G_2(s)$ 时的常规 PID、灰色预测 PID、Smith 预测 PID 3 种控制方法仿真曲线。

由图 6(a) 可见, 在控制对象为 $G_1(s)$ 确定的情况下灰色预测 PID 控制和 Smith 预估控制都能有较好的控制效果, 若 M 合适的情况下, 灰色预测控制比 Smith 预估控制有更好的控制效果。而从图 6(b) 可见, 在传递函数从 $G_1(s) \rightarrow G_2(s)$ 发生突变且 PID 参数不能自动调节情况下, 灰色预测环节对系统的行为进行了超前预测, 使灰色预测控制系统中被控对象的超调量得到很好地抑制; 而 Smith 预估器需精确知道对象变化后 $G_2(s)$ 才能得到好的预测控制效果, 若还是 $G_1(s)$ 进行预测补偿将不会有好的控制效果, 不加任何补偿的常规 PID 控制的控制参数

不能随 $G_1(s) \rightarrow G_2(s)$ 对象变化而自适应调整, 控制效果一般较差。灰色预测 PID 控制的鲁棒性优于传统 PID 控制、Smith 预测 PID 控制。



(a) 负荷为 $G_1(s)$ 时仿真曲线



(b) 负荷为 $G_2(s)$ 时仿真曲线

图 6 负荷从 $G_1(s)$ 变为 $G_2(s)$ 时 3 种控制方法仿真曲线

3 结 论

球磨机负荷对象存在着大滞后、慢时变、强非线性等复杂特性, 采用常规控制方法难以获得满意的控制效果。灰色预测具有提前预测、需要信息少、不需要精确对象模型、鲁棒性好、实现容易等优点, 将灰色预测与 PID 控制结合起来用于球磨机负荷控制方法。计算机仿真结果表明灰色预测 PID 控制具有良好的控制品质。本研究的控制思想可推广应用于存在大滞后的大量实际对象。

还有一些问题值得进一步研究。首先 GM(1, 1) 模型只是最简单的一种灰色模型, 它需要的信息最少的一种, 如果系统的结构可以通过改善获取到更多的“信息”时, 可使用更高级的模型, 将可以达到更高的精度; 其次, GM(1, 1) 算法也可以做适当调整, 如构建 B 矩阵的时候可以使用其他的公式来对累

加矩阵进行处理。在某些变化率更加快的系统中,这种算法会有更好的控制效果;最后,本研究采用的控制算法仅是在传统的 PID 控制基础上加上灰色预测模块, PID 控制器本身存在一些问题,如能采用智能控制器或复合控制器,可能会得到更好的控制品质。

参考文献:

- [1] 邓聚龙. 灰色控制系统[M]. 第2版. 武汉: 华中理工大学出版社, 1997.
- [2] 熊和金, 徐华中. 灰色控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [3] CHEN T M, LUO R C. Mobile target tracking using hierarchical grey-fuzzy motion decision-making method // Proceedings of Robotics and Automation[C]. USA: San Francisco, 2000. 2118-2123.
- [4] WANG JANZHONG, JI JIANGTAO, WANG HONGRU. Grey prediction fuzzy control of the target tracking system in a robot weapon[J]. Journal

of Beijing Institute of Technology, 2007, 16(4): 424-429.

- [5] 吴裕高, 朱学峰, 史步海. 基于灰色预测的大时滞过程的控制研究[J]. 控制工程, 2007, 14(3): 278-280.
- [6] 潘红华, 胡家升, 张圣云, 等. 基于灰色系统模型的预测函数控制方法研究[J]. 控制与决策, 2001, 19(1): 114-119.
- [7] 刘红军, 韩 璞, 姚万业. 时变大滞后系统的自适应灰色预测 PID 控制[J]. 华北电力大学学报, 2004, 31(5): 44-47.
- [8] 程启明, 郑 勇. 球磨机多模型 PID 型神经网络控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(2): 103-109.
- [9] 黄春岑, 于向军, 吕震中. 基于灰色预测 PID 球磨机负荷控制[J]. 自动化仪表, 2007, 28(3): 62-64.
- [10] 刘 蓉, 吕震中. 基于 T-S 模型模型的球磨机负荷控制系统[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(3): 17-20.
- [11] 程启明, 王勇浩. 基于 Smith 预估的模糊/PID 串级主汽温控制系统仿真[J]. 电工技术学报, 2007, 22(3): 143-147.
- [12] 刘 蓉, 吕震中. 基于内模-PID 控制的球磨机负荷控制系统的设计[J]. 电力设备, 2005, 6(1): 30-33.

新技术、新工艺

液体燃料转换成用于标准 DLE 燃烧的气体燃料

据《Gas Turbine World》2008年5-6月号报道,因为在 DLN(干式低 NO_x)燃烧室要求的燃料和空气预混部分内自动点火和逆燃,液体燃料不能直接在这些燃烧室内燃烧。

已经开发出低成本的气化和调节工艺,以便把液体燃料,如馏出油、生物柴油和由煤得到的石脑油转换成用于常规的 DLN 燃烧的气体燃料。

实际上,为了达到低排放,目前只燃烧天然气的燃气轮机装置提供了一个选项,以便选择转变到更容易得到和更便宜的液体燃料:

- 设备—在不需修改并且没有任何逆燃和自动点火危险的情况下,就可以使用原来为天然气设计的 DLN 燃烧室。

- 排放—在没有向燃烧室喷入水或蒸汽的情况下,使用气化液体燃料的燃气轮机的排放与使用天然气燃烧时的排放量相当。

- 经济性—相对于原来的燃料价格,设备和运行费用为每百万千焦耳增加 0.47~0.94 美元。

(吉桂明 摘译)

mogorov entropy being 0.297 bits/s. Finally, it should be noted that during a practical boiler operation, various indexes featuring chaotic characteristics can be used to further depict an in-furnace system, thus offering further guidance for the optimized operation of a utility boiler. **Key words:** pulverized coal-fired boiler, furnace pressure, chaotic characteristics

底饲进料循环喷动床内压力脉动信号的 SHANNON 信息熵分析 = **A Shannon Information Entropy Analysis of Pressure Fluctuation Signals From an Underfed Circulating Spouted Bed**[刊, 汉] / TAO Min, JIN Bao-sheng, YANG Ya-ping (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096), XUE Yu-lan (East China Electric Grid Co. Ltd., Shanghai, China, Post Code: 200002) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 618 ~ 622

To study the gas-solid two phase flow characteristics of an underfed circulating spouted bed, the authors have measured the pressure fluctuation signals at various heights in the axial direction of a reaction tower through a cold-state test, analyzed the pressure signals by using Shannon information entropy and compared the influence of different operating conditions on the gas-solid two-phase flow in the tower. It has been found that the pressure fluctuation and its power spectrum display different characteristics at different heights of bed layers and Shannon information entropy can reflect very well the complexity and stability degree of the characteristic signals. Enhancing the fluidized velocity and circulation ratio can lead to an increase of particle concentration in the axial direction of the tower, thus enhancing the amplitude of the pressure fluctuation. To increase the jet flow velocity and heighten the nozzle location can intensify the gas-solid turbulent flow at the bottom of the tower and Shannon information entropy can be increased accordingly. **Key words:** underfed circulating spouted bed, gas-solid two-phase flow, pressure fluctuation, Shannon information entropy

球磨机中颗粒混合运动的数值模拟 = **Numerical Simulation of Particle Mixing Movement in a Ball Mill**[刊, 汉] / GENG Fan, YUAN Zhu-lin, MENG De-cai (College of Energy Source and Environment, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096), LI Shan-lian (Key Laboratory on Tobacco Processing Technologies for Tobacco Processing Industry, Zhengzhou Academy of Tobacco, Zhengzhou, China, Post Code: 450001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 623 ~ 629

In view of the current situation that ball mills are widely used in thermal power plants and very little information about their inner particle mixing movements is known to us, a discrete elementary method is used to directly track every particle in a ball mill. By considering the joint action of gravity force, friction and collision resistance received by these particles, established was a three-dimensional dynamic model for the particles and numerically simulated was the whole process of their mixing movement in the ball mill. The influence of the key parameters, such as particle diameter, density and granularity unevenness etc. on the characteristics controlling the complex movement of particles in the ball mill was emphatically studied. The research results show that with the turning of the ball mill, all the particles in every area of the ball mill are gradually well mixed. The uniformity of such mixing in the ball mill at various places, however, is different. In the case of an identical filling rate, the time required by the small particles to mix uniformly is relatively long. In the event of an identical particle diameter, the time required by the particles with a higher density to mix uniformly is also relatively long. When the particle diameters are not uniform, with the turning of the ball mill, a layer-separation phenomenon will occur to the particles. **Key words:** ball mill, discrete elementary method, mixing movement, numerical simulation

火电厂钢球磨煤机负荷的灰色 PID 控制系统研究 = **Study of a Grey PID (Proportional, Integral and Differential) Control System for Ball Mill Load in a Thermal Power Plant**[刊, 汉] / CHENG Qi-ming, MIN Le-cong, LI Qin, et al (College of Electric Power and Automation, Shanghai University of Electric Power, Shanghai, China, Post Code: 200090) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 630 ~ 634

The load of a ball mill in a thermal power plant features such complicated characteristics as a big lagging, slow time variation and strong non-linearity etc., and it is difficult for conventional control methods to obtain a satisfactory control effectiveness. Therefore, the authors have presented a method for controlling the load of a ball mill based on a grey prediction PID (proportional, integral and differential) control, which integrates the design approach of the grey prediction with that of the conventional PID control, replaces the measured values of the controlled object with the on-line predicted results obtained from the grey prediction, and then performs a PID control operation. The Simulink simulation results show that the grey prediction-based PID control is superior to the conventional PID control and Smith-prediction-based PID one in respect of speediness, stability, adaptability, robustness and disturbance-resistant capability. **Key words:** ball mill load, grey prediction, GM (1, 1) model, PID (proportional, integral and differential) control, Smith predictor

真空条件下珠状凝结传热特性的理论分析与试验研究 = Theoretical Analysis and Experimental Study of Bead-shaped Condensing Heat Transfer Characteristics under a Vacuum Condition[刊, 汉] / GAO Ming, SHI Yue-tao, SUN Feng-zhong, et al (College of Energy Source and Power Engineering, Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 635 ~ 638

In contrast to the study of bead-shaped condensing heat transfer characteristics at a normal pressure, investigated were the above characteristics in a vacuum state from the following two aspects: theoretical analysis and experimental study. First, the authors have conducted a theoretical analysis from three angles: steam flow field, air-film heat resistance and surface energy. The analytic results show that the bead-shaped condensing heat exchange coefficient K increases with an increase of vacuum. Subsequently, the authors have also performed a bead-shaped condensing test under a vacuum condition. Data analysis shows that the test results are in agreement with the theoretical analytic ones, i. e. under a vacuum condition, the condensing heat exchange coefficient K increases with an increase of vacuum. In case of a relatively big Re number ($Re = 34755$), the heat exchange coefficient can increase by around 10% when the vacuum goes up by every 0.01 MPa. **Key words:** vacuum, bead-shaped condensing, heat transfer characteristics, surface energy

蜂窝式 SCR 催化剂烟气脱硝试验研究 = Experimental Study of Flue Gas Denitration by Using a Honeycomb Type SCR (Selective Catalytic Reduction) Catalyst[刊, 汉] / ZHU Chong-bing, JIN Bao-sheng, ZHONG Zhao-ping (Education Ministry Key Laboratory on Clean Coal Combustion and Power Generation Technology, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2009, 24(5). — 639 ~ 643

By employing a die set extrusion method, prepared was a honeycomb type 0.98%V₂O₅-9.65%WO₃/TiO₂-contained SCR (selective catalytic reduction) catalyst. By using BET (brunauer-emmett-teller), XRD (X-ray diffractometer), SEM (scanning electron microscope) and XRF (X-ray fluorescence) method etc., inspected and explored was the microstructure. On a SCR denitration test rig, tested was the performance of the catalyst under various conditions and conducted was a comparison with commercial catalysts having a similar structure. Through tests, it has been found that when the space velocity (SV) equals to 4 000 h⁻¹ and NH₃/NO ratio is 0.9 to 1.0 at a temperature within a range from 300 to 400 °C, under such circumstances, NO removal rate, SO₂ oxidation rate, N₂O formation rate and ammonia escape quantity of the self-prepared catalyst are comparatively close in performance to those of commercial catalysts, basically meeting the requirements for commercial applications. When the steam content is in excess of 5%, it has little influence on the NO removal rate, thus applicable for practical flue gases. During the tests, it has not been observed that SO₂ played a role of promoting the elimination of NO. The structural strength of the self-prepared catalyst is lower than that of the commercial catalysts, necessitating further improvement. **Key words:** honeycomb type catalyst, V₂O₅-WO₃/TiO₂, commercial catalyst, selective catalytic reduction (SCR), denitration